

## Evaluación técnico-económica de una planta de gasificación de biomasa residual del cultivo del limón para el abastecimiento energético de una citrícola de Tucumán. Parte II

Gisela F. Diaz\* y Dora Paz\*

### RESUMEN

La industria citrícola es de gran importancia en la provincia de Tucumán. En la industrialización del limón, el secado de la cáscara requiere el mayor consumo de gas natural, combustible que en época de zafra entra en déficit. Asimismo, el cultivo del limón genera grandes cantidades de biomasa residual no aprovechada. La gasificación es un proceso termoquímico de conversión de un sólido o líquido en un gas combustible mediante una combustión incompleta. El objetivo de este trabajo es realizar un análisis teórico evaluando, técnica y económicamente, una planta de gasificación de residuos biomásicos del cultivo del limón para abastecer con energía térmica el secado de cáscara de una citrícola que procesa 50 t/h de limón ubicada en Lules, provincia de Tucumán. En este artículo se presenta la segunda parte del trabajo, correspondiente a la evaluación económica. Se hizo un análisis económico determinando la inversión y los costos de operación, y un análisis de sensibilidad con respecto a las variables más importantes. La inversión inicial para el proyecto asciende a 49 millones de pesos, teniendo un alto impacto en la evaluación económica. El proyecto es económicamente viable con un préstamo del banco a una tasa de interés menor al 19% y/o con una venta de créditos de carbono con un valor superior a 6 €/t CO<sub>2</sub>.

**Palabras clave:** gas pobre, poda de limón, renovaciones de plantas, inversión, costo anual equivalente.

### ABSTRACT

#### Technical and economic evaluation of a residual biomass gasification plant from the lemon crop for the energy supply of a citrus fruit company from Tucumán. Part II

The citrus industry is of great importance in Tucumán. In the lemon processing, peel drying has the highest consumption of natural gas. This fuel comes into deficit at harvest time. Large amounts of biomass waste are generated from lemon cultivation, which is not being exploited. Gasification is a thermochemical conversion process of a solid or liquid fuel into a gas by incomplete combustion. The aim of this study is to carry out a theoretical analysis, evaluating technically and economically a gasification plant of biomass residues from lemon harvest. The resultant gas of the gasification plant supply energy to the lemon peel drying of a 50 t/h factory located in Lules (Tucumán, Argentina). This article presents the second part of the work: the economical evaluation. An economic analysis was performed, determining the investment and operating costs, and a sensitivity analysis was carried out regarding the most important variables. The initial investment for the project is 49 million pesos, with a high impact in the economic analysis. The project is economically viable with a bank loan at a lower interest rate to 19%, and / or a sale of carbon credits with a value superior than 6 € / t CO<sub>2</sub>.

**Key words:** lean gas, lemon pruning, renovations plant, investment, equivalent annual cost.

Artículo recibido: 16/11/16 y Aceptado: 31/08/17

---

\* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC, [gdiaz@eeaoc.org.ar](mailto:gdiaz@eeaoc.org.ar)

## INTRODUCCIÓN

La industria cítrica de Tucumán ocupa los primeros puestos a nivel mundial (Paredes *et al.*, 2013). Uno de los productos obtenidos del procesamiento del limón es la cáscara seca, cuyo proceso requiere el mayor consumo de gas natural de la fábrica. Este combustible entra en déficit en época de zafra, ocasionando cortes en el suministro a industrias. Una solución a esta problemática es el aprovechamiento de la biomasa residual generada por el propio cultivo del limón a través de las actividades de poda y renovación de plantaciones. Esta biomasa de origen leñosa se genera en grandes cantidades y puede ser aprovechada energéticamente mediante gasificación: un proceso termoquímico de conversión de un sólido o líquido en gas combustible mediante combustión incompleta (Silva Lora *et al.*, 2014).

El análisis económico-financiero de un proyecto es de suma importancia para determinar la viabilidad de este y es una herramienta de elección cuando se analizan dos o más proyectos. Se tiene en cuenta la faceta monetaria, que es de interés en el presente estudio, para el análisis de la viabilidad de la instalación de una planta de gasificación junto a las unidades de almacenamiento.

En la Argentina no se tienen antecedentes en cuanto a la evaluación económica de una planta de gasificación de biomasa. Sí existe información de plantas instaladas en Europa para generación de energía eléctrica, donde puede estimarse una inversión específica de plantas completas, llave en mano, de hasta 5 MW eléctricos, que oscila en 3000 €/MW. Las plantas de mayor tamaño, entre 5 y 10 MW, pueden alcanzar valores de la inversión específica de 2500 €/MW (IDAE y BESEL SA, 2007). Asimismo, los costes de operación y mantenimiento, sin contar el coste de la biomasa, se estabiliza en valores cercanos a 16 €/MWh a partir de los 8-9 MW (eléctrico), que equivalen a unas 40.000 t/año de

biomasa (IDAE y BESEL SA, 2007). En un estudio de una planta de gasificación de biomasa residual de la actividad agrícola de una comarca en España se obtuvo un coste unitario de generación eléctrica de 124,4 €/W, cuando el coste de la biomasa es de 37,2 €/t (Cañadas Molina, 2014).

El objetivo de este trabajo es evaluar técnica y económicamente una planta de gasificación de residuos biomásicos del cultivo del limón para abastecer con energía térmica el secado de cáscara de una cítrica que procesa 50 t/h de limón ubicada en el departamento de Lules, provincia de Tucumán, Argentina. En este artículo se presenta la segunda parte del trabajo, correspondiente al análisis económico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En la primera parte de este estudio se desarrolló la evaluación técnica del proyecto. Un esquema general del procesamiento de la materia prima se puede visualizar en la Figura 1. El procesamiento incluye transporte de la biomasa residual de fincas a centros logísticos de biomasa (CLB), pre-acondicionamiento (secado natural y astillado), transporte a la fábrica, secado de las astillas, gasificación y limpieza del gas pobre, combustión del gas pobre en las cámaras de secaderos, transferencia de masa y energía en secaderos de cáscara.

A partir de los resultados del estudio técnico se procede a realizar la evaluación económica.

Para decidir si es conveniente la implementación del proyecto, en adelante "Proyecto B", se debe comparar con el análisis económico de la situación actual, consumiendo gas natural, en adelante "Proyecto A".

### Costos del Proyecto A

Para el proyecto A se calcula el costo del combustible mediante la Ecuación 1, teniendo en cuenta un consumo de 10.000 kW en el secadero de cáscara, un poder calorífico inferior del gas natural de 4.602,4 kJ/Nm<sup>3</sup>,

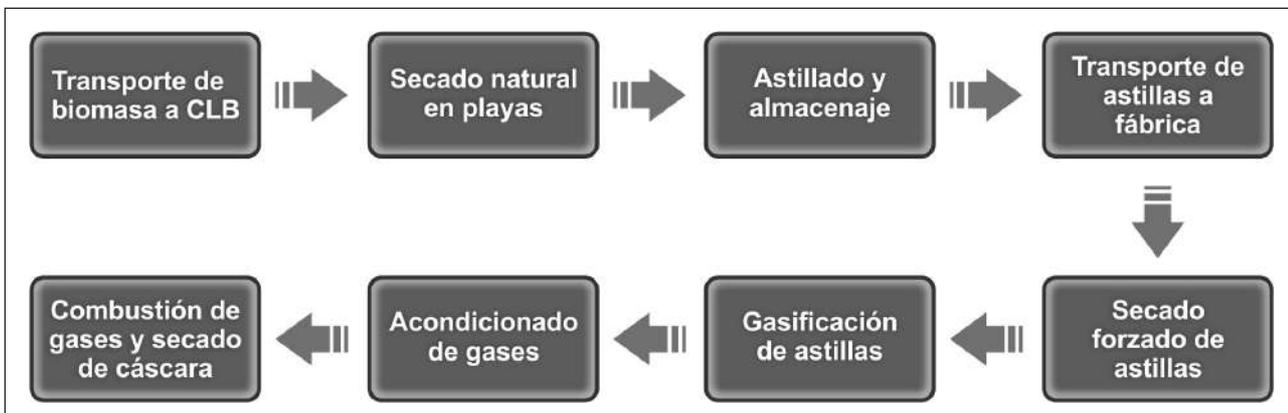


Figura 1. Esquema del proceso propuesto para el aprovechamiento energético de la biomasa como combustible.

un precio de gas natural para industria de 0,276 USD/Nm<sup>3(1)</sup>, un tipo de cambio de 15 \$/USD, un tiempo de operación anual de 4.620 h y una pérdida de energía derivada del gas natural del 20%.

$$C_{GN} = \frac{E_{tr}}{PCI_{GN}} * t_{op} * P_{GN} * (1 + p_{GN}) * 3600$$

Ec. 1

donde:

$C_{GN}$ : costo de consumo de gas natural, en \$/año.

$E_{tr}$ : requerimientos de energía térmica en secaderos, en MW

$PCI_{GN}$ : poder calorífico inferior del gas natural, en kJ/Nm<sup>3</sup>.

$t_{op}$ : tiempo de operación anual, en h/año.

$P_{GN}$ : precio del gas natural para industrias, en \$/Nm<sup>3</sup>.

$p_{GN}$ : pérdida de energía derivada del gas natural.

### Inversión del proyecto B

Para el proyecto B se tiene en cuenta los requerimientos de las operaciones y se determinan los equipos importantes a adquirir y la infraestructura necesaria a construir.

Para los centros logísticos de biomasa (CLB) se necesita la compra de equipamiento y la realización de la obra civil de los almacenes. El equipamiento consta de dos unidades de camiones, un tractor con pala cargadora y pinza de agarre de troncos y una astilladora. De cálculos anteriores (Díaz y Paz, 2017) la superficie necesaria estimada para los CLB fue de 25.390 m<sup>2</sup>. El costo de la obra civil de los CLB se estimó por m<sup>2</sup> de superficie cubierta, se tomó un valor de 3.000 \$/m<sup>2</sup> construido. De CLB en funcionamiento (Riera Mora, 2013), se estima la superficie cubierta necesaria como un 3,5% del total de la superficie destinada. El costo del terreno obtenido de un sondeo del mercado se asumió en 250 \$/m<sup>2</sup> para la zona.

Para la planta de secado y gasificación se tiene el módulo de gasificación con todos sus componentes, el secadero de astillas, los quemadores de gas pobre y la obra civil. Debido a la complejidad de la planta, se estiman otros costos derivados, directos e indirectos, mediante factores relativos (Peters & Timmerhaus, 1993) basados en los costos de equipos (Tabla 1). El costo del secadero se tomó de un estudio sobre la adecuación de la biomasa como combustible de 80 k\$/t/h (Martínez Reyes *et al.*, 2014).

### Costos del proyecto B

#### Costos fijos

Se consideran para los costos fijos solo los derivados de los sueldos del personal fijo: supervisores,

jefes, etc. Los sueldos del personal fijo de la fase operativa del proyecto se estiman de un sondeo del mercado. El costo fijo anual derivado del pago de sueldos será la sumatoria de los sueldos por el número de personas por cargo y por los meses de actividad anual, adicionándose un 65% por cargas sociales. En la Tabla 2 se muestra el personal fijo necesario para la operación del proyecto junto con los meses en actividad.

#### Costos variables

Los costos variables son dependientes de la operación de la planta. Se considera que la materia prima en sí no tiene precio de venta ya que proviene de fincas propias de las cítricas. Asimismo, no se tiene gastos derivados de la poda y arranque de plantas ya que estas actividades son propias de la cosecha del limón, como así tampoco de los gastos de recolección de los residuos generados y acumulación en los caminos alledaños.

Para el proyecto B se determinan los siguientes costos variables:

#### Costos de combustible de camiones

Se calcula el consumo de combustible por viaje y el costo anual debido al gasto de combustible en transporte de la biomasa a CLB mediante las Ecuaciones 2, 3 y 4. Se tiene en cuenta que en el primer año del proyecto solo se tiene tres meses de transporte hacia la planta debido a la disponibilidad de biomasa seca.

$$Comb_{viaje} = 2 * \frac{x}{C_{cam}} \quad \text{Ec. 2}$$

$$N^{\circ}viajes_{nec} = \frac{B_{rm}}{B_{camión} * (1 - w_{H_2O_t}) * (1 - P_b)} \quad \text{Ec. 3}$$

$$C_{comb,t} = Comb_{viaje} * N^{\circ}viajes_{nec} * t_{mes} * t_{año} * P_{comb} \quad \text{Ec. 4}$$

donde:

$Comb_{viaje}$ : consumo de combustible por viaje por camión L/viaje

$x$ : distancia media de transporte entre fincas y CLB, en km

$C_{cam}$ : consumo específico de combustible por camión, en km/L.

$N^{\circ}viajes_{nec}$ : número de viajes necesarios por día para cubrir los requerimientos, en viajes/día

$B_{rm}$ : Biomasa requerida mensual por la planta, en t/mes

$B_{camión}$ : biomasa capaz de transportar por camión, en t/viaje

$w_{H_2O_t}$ : humedad centesimal de la biomasa a transportar

$P_b$ : pérdida centesimal de la biomasa húmeda por transporte y manipulación

$C_{comb,t}$ : costo de combustible anual para el transporte de biomasa a CLB o a planta, en \$/año

<sup>1</sup> Precio estimado por técnicos de cítrica para la zafra 2016 teniendo en cuenta un valor de 0,212 USD/Nm<sup>3</sup> para el año 2015.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de tipos de gasificador.

Rubro	Porcentaje del costo de equipo entregado
<b>Costos directos</b>	
Equipo adquirido y entregado (incluyendo equipo fabricado y maquinaria para el proceso)	100
Instalación del equipo adquirido	40
Instrumentación y controles (instalados)	9
Cañerías y tuberías (instaladas)	8
Instalaciones eléctricas (colocada)	7
Obras civiles (incluyendo servicios)	10
Mejoras del terreno	7
Instalaciones de servicios (montadas)	10
Terreno (si es necesario adquirirlo)	3
<b>Costo directo total de la planta</b>	<b>194</b>
<b>Costos indirectos</b>	
Ingeniería y supervisión	10
Gastos de construcción	10
<b>Total de costos directos e indirectos de la planta</b>	<b>214</b>
Honorarios del contratista (aproximadamente el 5% de los costos directos e indirectos de la planta)	10
Eventuales (alrededor del 10% de los costos directos e indirectos de la planta)	10
<b>Inversiones de capital fijo</b>	<b>234</b>
<b>Inversión total de capital</b>	<b>234</b>
<b>Capital de trabajo: alrededor del 15% de la inversión total de capital</b>	

Fuente: (Peters & Timmerhaus, 1993), elaboración propia.

Tabla 2. Personal fijo necesario para la fase operativa del proyecto.

Actividad	Cargo	Cantidad de personas		Meses de actividad
		Por turno	Total	
Supervisor de logística de biomasa en CLB	Supervisor	1	2	7
Supervisor en planta de secado y gasificación	Supervisor	1	3	7
Mantenimiento en CLB	Operario	1	2	9
Mantenimiento en planta	Operario	1	2	9

$t_{mes}$ : tiempo de funcionamiento, en días/mes  
 $t_{año}$ : tiempo de funcionamiento, en meses/año  
 $P_{comb}$ : precio del combustible, en \$/L.

El tiempo de trabajo de cada camión se asume de 12 horas diarias en dos turnos, 30 días al mes, cuatro meses de actividad por año para el transporte a CLB. En el caso del transporte a la planta las ecuaciones

empleadas son las mismas, los camiones trabajan 16 horas diarias, en dos turnos y siete meses por año, con la salvedad del primer año cuando se tiene tres meses de actividad. Asimismo la capacidad de carga de cada camión se calculó como el producto de la capacidad volumétrica de 40 m<sup>3</sup> por la densidad aparente de la biomasa de 0,4 t/m<sup>3</sup>. La pérdida de biomasa debido al

transporte se asumió del 10%. El valor del precio del combustible se tomó en 15 \$/L (marzo 2016). Se asume un consumo de combustible de los camiones de 2,5 km/L.

#### Costos de combustible de tractores

Para determinar los costos derivados del consumo de combustible de los tractores se debe conocer el consumo específico de estos. Esta característica depende del tipo de motor, de la potencia nominal y del régimen de trabajo. Los tractores poseen motores diésel cuyo consumo específico a plena carga se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3. Consumo específico de motores diésel según la potencia.**

Potencia del motor diésel [CV]	Consumo específico [L/h]
50	20 - 13
100	22 - 25
150	33 - 38
200	44 - 50
250	55 - 63
300	66 - 75

Para estimar el régimen de carga se calcula el cociente entre la masa que transporta y la capacidad nominal de carga. Este cociente se afecta al consumo específico para obtener el consumo real del tractor.

Tanto para el transporte de astillas como para el transporte de la biomasa a la playa de secado se emplea la Ecuación 5 para el cálculo del consumo de combustible de los tractores.

$$C_{comb, trac} = C_{trac} * t_{func} * t_{mes} * t_{año} * P_{comb} \quad \text{Ec. 5}$$

donde:

$C_{comb, trac}$ : Costo de combustible derivado del uso de los tractores, en \$/año.

$c_{trac}$ : Consumo específico de combustible del tractor, en l/h.

y los demás parámetros tienen el mismo significado que en la Ecuación 3. La actividad de transporte de biomasa de las playas de secado se realiza cuatro meses al año, mientras que el transporte de astillas se lleva a cabo durante siete meses del año. El precio del diésel se toma en 16,65 \$/L (marzo 2016).

#### Costos de combustible para la operación de la astilladora

Para el cálculo del costo de combustible proveniente del accionar de la astilladora se tiene en cuenta su consumo horario y tiempo de funcionamiento (Ecuaciones 6 y 7).

donde:

$$t_{func, ast} = \frac{B_{ast}}{C_{ast}} \quad \text{Ec. 6}$$

$$C_{comb, a} = c_a * t_{func, ast} * t_{mes} * t_{año} * P_{comb} \quad \text{Ec. 7}$$

$B_{ast}$ : biomasa a astillar de los dos CLB, en t/día.

$C_{ast}$ : capacidad de procesamiento de la astilladora, en t/h.

$t_{func, ast}$ : tiempo de funcionamiento de la astilladora, en h/día.

$C_{comb, a}$ : costo de combustible derivado del uso de astilladora, en \$/año.

$c_a$ : consumo de combustible de la astilladora, en L/h.

$P_{comb}$ : precio de la nafta, en \$/L.

El consumo de combustible de la astilladora informado por el fabricante es de 29 L/h. La cantidad de biomasa a astillar es de 5.554 t/mes al 30% de humedad en base húmeda, en dos turnos, 30 días por mes durante cuatro meses.

#### Costos de mantenimiento de equipos y rodados

El mantenimiento de equipos y rodados se estimó en un 3% del valor de compra de estos durante su vida útil. Pasados estos años se estima un incremento del 0,5% de este factor. Se tuvieron en cuenta en los costos de mantenimiento a camiones, astilladora, equipos incluidos en la planta de gasificación y el secadero de astillas (Ecuación 8).

$$C_{mant, k} = f * C_k \quad \text{Ec. 8}$$

Siendo:

$C_{mant, k}$ : costo derivado del mantenimiento del equipo o rodado k, en \$/año.

$C_k$ : costo del equipo o rodado k, en \$.

$f$ : factor de proporción de costos de mantenimiento, en 1/año.

#### Costos de salarios de operarios

En la Tabla 4 se presenta el personal necesario para la operación del proyecto y los meses en actividad anuales. Se estiman los salarios en base a un sondeo de mercado.

El costo anual derivado del pago de salarios será la suma de los salarios por el número de operarios por cargo y por los meses de actividad anual, con la adición del 65% por cargas sociales.

#### Depreciación de equipos y rodados del proyecto B

La depreciación es la pérdida del valor que experimenta el inmovilizado debido al uso, envejecimiento, desgaste, obsolescencia o por el simple paso del tiempo; y

Tabla 4. Personal asalariado del proyecto.

Actividad	Cargo	Cantidad de personas		Meses de actividad
		Por turno	Total	
Transporte de biomasa a CLB	Chofer	1	2	4
Transporte de biomasa a la planta	Chofer	1	1	7
Astillado de biomasa en CLB	Operario	1	2	4
Transporte de biomasa en tractor	Operario	1	2	7
Almacenamiento de biomasa en CLB	Operario	1	2	12
Almacenamiento de biomasa en planta	Operario	1	3	12
Secado y gasificación de biomasa	Operario	1	3	7

es un valor anual deducible de impuestos a ingresos brutos. Por ley, en nuestro país se usa el método de depreciación lineal que consiste en calcular la depreciación anual como una proporción fija del valor original del inmovilizado.

Para equipos y maquinaria en general se tiene una vida útil de 10 años; para rodados este valor es de cinco años; mientras que las obras civiles se deprecian en 30 años. Debido a que el proyecto tiene una vida útil de 15 años, se asume que los rodados podrán ser utilizados por siete años y luego reemplazados por rodados nuevos. Asimismo se supone que los equipos podrán ser operados hasta el fin de la vida útil del proyecto. El valor residual de los rodados al año 8 se toma como el 30% del valor del rodado nuevo. En el caso de los equipos se asume un valor residual en el año 16 de un 15% del valor nuevo. Por otra parte, el residual de la obra civil al final de la vida útil del proyecto se toma como el valor restante entre el valor nuevo y lo amortizado.

**Ingresos por venta de bonos de carbono**

Para estimar la reducción de emisiones que se lograría al implementar el proyecto de reemplazo del gas natural por gas pobre producto de la biomasa residual, se estiman, en primer lugar, las emisiones para cada escenario. Se adoptaron factores de emisión obtenidos de AVEBIOM (2012). En este estudio, el análisis energético abarca toda la energía no renovable que se consume a lo largo de la cadena: extracción, procesado, almacenamiento, conversión energética del combustible, incluido el coste de la energía de la maquinaria y las herramientas utilizadas en cada fase, empleando la base de datos GEMIS (Modelo de Emisiones Globales para Sistemas Integrados - Global Emission Model for Integrated Systems version 4.42, Oko-Institut e.V. Darmstadt (Alemania) www.oeko.de).

**Emisiones del uso de gas natural**

Considerando solo la combustión de gas natural, se tiene un factor de emisión de dióxido de carbono de 233,96 kg CO<sub>2</sub> /MWh y un factor de 257,72 kg CO<sub>2</sub> eq./MWh que incluye además otros gases de efecto invernadero como ser metano y óxido nitroso (AVEBIOM, 2012). El producto de estos factores por los requerimientos de energía anuales resulta en las emisiones producidas (Ecuaciones 9 y 10).

$$emisiones\ CO_{2GN} = \frac{fCO_{2GN}}{1000} * E_{tr} * t_{op} \quad Ec. 9$$

$$emisiones\ CO_{2eqGN} = \frac{fCO_{2eqGN}}{1000} * E_{tr} * t_{op} \quad Ec. 10$$

donde:

*E<sub>tr</sub>*: requerimientos de energía térmica en secaderos, en MW.

*t<sub>op</sub>*: tiempo de operación de la planta, en h/año.

*emisiones CO<sub>2GN</sub>*: emisiones anuales de dióxido de carbono por combustión de gas natural, en tCO<sub>2</sub>/año.

*emisiones CO<sub>2eqGN</sub>*: emisiones anuales de dióxido de carbono equivalente por combustión de gas natural, en tCO<sub>2</sub> eq/año.

*fCO<sub>2GN</sub>*: factor de emisión de dióxido de carbono por combustión de gas natural, en kg CO<sub>2</sub> /MWh.

*fCO<sub>2eqGN</sub>*: factor de emisión de dióxido de carbono equivalente por combustión de gas natural, en kg CO<sub>2</sub> eq./MWh.

**Emisiones del reemplazo de gas natural por gas pobre**

Para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del uso de gas pobre se procede de manera similar que para el gas natural (Ecuaciones 11 y 12), teniendo en cuenta un factor de emisión de dióxido de carbono de 21,13 kg CO<sub>2</sub> /MWh y un factor 23,95 kg CO<sub>2</sub> eq./MWh (AVEBIOM, 2012).

$$emisiones\ CO_{2_{gas\ pobre}} = \frac{fCO_{2_{gas\ pobre}}}{1000} * E_{tr} * t_{op} \quad Ec. 11$$

$$emisiones\ CO_{2_{eq_{gas\ pobre}}} = \frac{fCO_{2_{gas\ pobre}}}{1000} * E_{tr} * t_{op} \quad Ec. 12$$

donde

$emisiones\ CO_{2_{gas\ pobre}}$ : emisiones anuales de dióxido de carbono por combustión de gas pobre, en tCO<sub>2</sub>/año.

$emisiones\ CO_{2_{eq_{gas\ pobre}}}$ : emisiones anuales de dióxido de carbono equivalente por combustión de gas pobre, en tCO<sub>2</sub> eq/año.

$fCO_{2GN}$ : factor de emisión de dióxido de carbono por combustión de gas pobre, en kg CO<sub>2</sub> /MWh.

$fCO_{2eqGN}$ : factor de emisión de dióxido de carbono equivalente por combustión de gas pobre, en kg CO<sub>2</sub> eq./MWh.

$E_{tr}$  y  $t_{op}$  son los mismos que en las ecuaciones 9 y 10.

### Reducción de emisiones

Luego, la reducción de emisiones totales que se traducen en certificados de reducción de emisiones (CER) se calcula mediante la Ecuación 13.

$$CER = emisiones\ CO_{2_{eq_{GN}}} - emisiones\ CO_{2_{eq_{gas\ pobre}}} \quad Ec. 13$$

Estos CER tienen un valor de mercado que se actualiza diariamente. Tomaremos para el cálculo un valor de 6 €/tCO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta un tipo de cambio de 17 euros por peso argentino (Investing, 2016).

### Apalancamiento financiero del proyecto B

El apalancamiento financiero es el grado en que una compañía se financia con deuda (Finnerty & Stowe, 2000). Para el cálculo de intereses y desembolsos por pago de la deuda se supone un máximo de crédito del 70% de la inversión, a pagar en un lapso de cinco años y una tasa de interés anual del 33% (tasa activa de cartera general del Banco Central de la República Argentina, febrero 2016). La frecuencia de amortización es trimestral. Debido a que se considera un año de gracia en el cual solo se pagan intereses, la amortización se abona finalmente en 16 trimestres.

### Cálculo del CAE

El CAE es el costo equivalente por año de poseer un activo durante su vida útil (Finnerty & Stowe, 2000). La

metodología del costo anual equivalente se utiliza cuando se debe decidir entre proyectos alternativos, con vidas útiles diferentes y donde los ingresos no revisten importancia a la hora de tomar la decisión. El CAE se calcula como un pago de anualidad ordinaria que tiene el mismo valor actual que los costos del activo.

Para el cálculo del CAE se siguen los pasos derivados de las ecuaciones 14 a 18.

donde:

$NCF_{proy,j}$ : Net Cash Flow, flujo de caja neto del proyecto para cada año j, en \$/año.

$NCF_{fin,j}$ : Net Cash Flow, flujo de caja neto de la financiación de la inversión para cada año j, en \$/año.

j: año del proyecto.

n: Vida útil del proyecto.

$I_j$ : Inversión para cada año j, en \$/año.

$CCN$ : Capital circulante neto o capital de trabajo, en \$/año (corresponde sólo al primer año).

$R_j$ : Residual de bienes al final de su vida útil para cada año jv en \$/año.

$V_j$ : Ventas para cada año j, en \$/año.

$C_j$ : Costos para cada año j, en \$/año.

$D_j$ : Depreciación para cada año j, en \$/año.

$c_{f,j}$ : Intereses de financiación para cada año j, en \$/año.

i: Tasa de impuestos, centesimal.

$P_j$ : Préstamo para cada año j, en \$/año.

$r_j$ : Desembolsos del crédito para cada año j, en \$/año.

$VAN$ : Valor actual neto de los flujos de caja, en \$/año.

t: Tasa de descuento, centesimal.

$CAE$ : Costo anual equivalente, en \$.

Se tomó una tasa de descuento t del 25% y una carga impositiva i del 35% a las ganancias de la empresa.

### Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una técnica que permite conocer la sensibilidad o variación de los indicadores de rentabilidad frente a diferentes parámetros como ser inversión inicial, costos, duración del proyecto, tasa de descuento, tasa de interés, etc. Esto posibilita la comparación con otras alternativas, o brinda un posible panorama ante cambios en la situación del mercado, cambios en el proyecto, etc.

$$NCF_{proy,j} = (-I_j - CCN + R_j) + \frac{(V_j - C_j - D_j - c_{f,j}) - i * (V_j - C_j - D_j - c_{f,j})}{D_j + c_{f,j}} \quad Ec. 14$$

$$NCF_{fin,j} = P_j - r_j \quad Ec. 15$$

$$NCF_j = NCF_{proy,j} + NCF_{fin,j} \quad Ec. 16$$

$$VAN = \sum_{j=1}^n \frac{NCF_j}{(1+t)^j} \quad Ec. 17$$

$$CAE = VAN * \frac{t * (1+t)^n}{(1+t)^n - 1} \quad Ec. 18$$

Se define la sensibilidad de un parámetro como la relación entre la variación del CAE y la variación del parámetro (Ecuación 19).

$$S_p = \frac{\Delta CAE}{\Delta p} * \frac{p}{CAE} \quad \text{Ec. 19}$$

siendo:

$S_p$ : sensibilidad del CAE con respecto al parámetro  $p$ .

$\Delta CAE$ : variación del CAE causada por la variación del parámetro.

$\Delta p$ : variación del parámetro.

$p$ : valor del parámetro.

En este caso se decidió realizar un análisis de sensibilidad teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

#### Costo del gas natural

Para el proyecto A, sólo se tiene en cuenta el costo del combustible que se quiere reemplazar, por lo tanto es el único parámetro a analizar. La tarifa industrial del gas natural en nuestro país en el año 2015 fue casi dos veces la tarifa promedio de otros países sudamericanos (Metrogas, 2015). Esto viene sucediendo en los últimos años debido a una fuerte subvención del gobierno. Actualmente se está revirtiendo la situación con la quita de subsidios y consiguiente suba de tarifas. Para contemplar esta situación, se realiza un análisis de sensibilidad con un rango de variación de [-50%, +50%] del precio de gas natural.

#### Costo de combustibles

El costo de los combustibles está emparejado con el valor del dólar en una relación para la nafta próxima a 1. Debido a la devaluación del peso argentino de alrededor del 40%, en los últimos meses se tuvo un aumento de igual proporción en el valor de los combustibles (Secretaría de Energía, 2013). Debido a la inflación, es de esperarse nuevos aumentos para los meses subsiguientes. Se evalúan los valores de CAE resultantes teniendo en cuenta variaciones positivas y negativas con respecto al valor base. El rango de variación para el análisis de sensibilidad se tomó en [-50%, +50%].

#### Valor de venta de bonos de carbono

Un estudio de la evolución del valor de mercado de los bonos de carbono (Investing, 2016) en los últimos tiempos, muestra picos de valores próximos a 30 €/tCO<sub>2</sub> a comienzos del año 2008, lejanos al valor actual de alrededor de 5 €/tCO<sub>2</sub> (enero 2016). Asimismo, también se reportan valores que rondaron los 8 €/tCO<sub>2</sub> unos meses atrás (noviembre 2015). Esta gran variabilidad en el valor de bonos de carbono lleva a analizar la situación económica-financiera del proyecto B con diferentes escenarios. El

análisis de sensibilidad se lleva a cabo con un rango de variación de [-50%, +50%] del valor del caso base.

#### Tasa de interés del crédito

Existen actualmente numerosos incentivos a la inversión industrial para empresas grandes, pequeñas y medianas. Para nuestro proyecto se destacan las líneas de crédito del Banco de Inversión y Comercio Exterior, que cuenta con una serie de líneas de financiación en pesos y en dólares; por ejemplo, para proyectos de inversión en energía renovable que permitan atender la mayor demanda del sector productivo. En resumen, se tiene mejores perspectivas en cuanto a la tasa de interés que se puede encontrar a la hora de tomar un crédito con destino a la inversión industrial. Es por ello que se realiza un estudio de la sensibilidad del CAE con respecto a este parámetro con un rango de variación de [-50%, +50%] del valor tomado para el caso base.

#### Distancia a CLB

La distancia media de transporte de biomasa desde las fincas a los CLB para el caso base es de 2,5 km. Esta distancia puede ser considerablemente mayor si se consideran fincas alejadas de la planta o cercanías con menor densidad de cultivo de limón. Para el estudio de sensibilidad se tomaron en cuenta valores de distancia media de transporte de [2 km, 30 km]. Una distancia media de transporte de 30 km desde las fincas a los CLB corresponde a la máxima distancia identificada de las fincas a la planta de 120 km.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Cálculo del CAE

#### Proyecto A

El costo del combustible del proyecto A resulta en alrededor de 20 millones de pesos, calculado para un precio de 0,276 USD/Nm<sup>3</sup> (precio estimado por técnicos de la citrícola para la zafra 2016), teniendo en cuenta un tipo de cambio de 15 \$/USD.

#### Proyecto B

Los equipos, infraestructura y terreno a comprar para el proyecto B se detallan en la Tabla 5, junto con su valor de mercado. En total, la inversión inicial asciende al valor de \$ 49.287.050.

La Tabla 6 resume los resultados obtenidos de los cálculos de emisiones de gases de efecto invernadero.

Puede verse que las emisiones derivadas del gas pobre representan un 9% de las emitidas por la combustión de gas natural. Con el reemplazo del gas natural por gas pobre se obtiene una reducción estimada en 10.800 t/año de CO<sub>2</sub> equivalente, que representa el 91% de remoción.

**Tabla 5. Equipos e infraestructura de los CLB.**

Equipos e infraestructura	Valor	Porcentaje del total
Terreno CLB	\$ 3.173.750	6,40%
Infraestructura CLB	\$ 2.665.950	5,40%
Tractores cargadores	\$ 1.140.000	5,10%
Camiones	\$ 2.520.000	1,40%
Astilladora	\$ 667.350	2,30%
Secadero de astillas	\$ 4.800.000	9,70%
Planta gasificadora	\$ 15.150.000	30,70%
Costos de construcción e instalación de la planta	\$ 17.145.500	34,80%
Quemadores	\$ 2.025.000	4,10%
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 49.287.050</b>	<b>100%</b>

En el escenario de venta de bonos de carbono los ingresos resultaron en 1.101.618 \$/año para el valor de referencia de los bonos de 6 €/tCO<sub>2</sub>.

La Tabla 7 muestra los costos fijos y variables calculados para el proyecto B.

La Tabla 8 muestra los valores obtenidos del Valor Actual Neto (VAN) y CAE para los casos analizados, expresados en miles de pesos.

**Tabla 6: Resultados de la estimación de emisiones reducidas.**

Combustible	Emisiones	
	CO <sub>2</sub> [t/año]	CO <sub>2</sub> eq. [t/año]
Gas natural	10.809	11.907
Gas pobre	976	1.106
Reducción	9.833	10.800

#### **Análisis de sensibilidad**

En resumen, los resultados del análisis de sensibilidad se muestran en la Tabla 9.

Como se puede observar en la Tabla 9 y la Figura 2, el análisis de sensibilidad del Proyecto A resulta en una relación lineal entre el precio del gas natural y el CAE, con una sensibilidad de 1.

Del análisis de sensibilidad del Proyecto B se puede observar que la tasa de interés del crédito es el factor más influyente en el valor de CAE con una sensibilidad de 0,23, y 0,25 para el proyecto con venta de bonos de carbono (Figura 3). Le sigue el valor de los bonos de carbono, con una sensibilidad de -0,050. Por último se tiene los parámetros de incidencia bastante menores: el precio de combustibles y la distancia a los CLB. Asimismo, del análisis de sensibilidad resulta que el escenario de igualdad de CAE entre los proyectos A y B

se presenta a una tasa de interés del crédito de 19%, con 6 €/tCO<sub>2</sub> de valor de mercado de bonos de carbono

#### **CONCLUSIONES**

La inversión del proyecto asciende a \$ 49 millones, siendo los costos de la planta de gasificación los de mayor impacto. En cuanto a los costos operativos del proyecto, resultaron en alrededor de \$ 6,5 millones.

Desde el punto de vista económico, el proyecto cuenta con una inversión elevada, con el valor de la planta de gasificación como el elemento de mayor impacto, y con bajos costos de operación. Se concluye que el CAE del proyecto de reemplazo de gas natural por gas pobre proveniente de la biomasa residual lo vuelve preferible frente a la situación actual en un escenario en el que se tiene un préstamo del banco a una tasa de interés menor al 19% y/o se tiene una venta de créditos de carbono con un valor superior a 6 € / t CO<sub>2</sub>. Teniendo en cuenta los numerosos incentivos a la inversión industrial, el proyecto tiene un futuro económico prometedor, adicionando los beneficios derivados del autoabastecimiento de la planta sin riesgos de cortes del suministro.

#### **BIBLIOGRAFÍA CITADA**

- AVEBIOM. 2012.** Biomass Trade Centre2 - EU. Manual de Combustibles de Madera. [En línea] Disponible en [www.biomasstradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/pdf](http://www.biomasstradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/pdf) (consultado el 5 de marzo de 2015)
- Cañadas Molina, V. 2014.** Diposit Digital de la UB - Universidad de Barcelona. Análisis de la viabilidad técnica y económica de una planta de gasificación de biomasa residual agrícola para suministro de una central de cogeneración en la comarca Segria. [En

Tabla 7: Costos fijos y variables del proyecto B.

Año	Costos Fijos	Costos Variables	Total
Año 1	2.219.250	4.341.292	6.560.542
Año 2	2.219.250	4.479.050	6.698.300
Año 3	2.219.250	4.479.050	6.698.300
Año 4	2.219.250	4.479.050	6.698.300
Año 5	2.219.250	4.479.050	6.698.300
Año 6	2.219.250	4.497.350	6.716.600
Año 7	2.219.250	4.515.650	6.734.900
Año 8	2.219.250	4.479.050	6.698.300
Año 9	2.219.250	4.479.050	6.698.300
Año 10	2.219.250	4.479.050	6.698.300
Año 11	2.219.250	4.582.137	6.801.387
Año 12	2.219.250	4.685.223	6.904.473
Año 13	2.219.250	4.806.610	7.025.860
Año 14	2.219.250	4.927.997	7.147.247
Año 15	2.219.250	5.049.384	7.268.634

Tabla 8: Valores de VAN y CAE obtenidos para los proyectos analizados en miles de pesos.

Escenario	Proyecto A		Proyecto B	
	VAN	CAE	VAN	CAE
Sin apalancamiento	-50.040	-12.966	-62.449	-16.182
Con apalancamiento			-58.553	-15.172
Con apalancamiento y venta de bonos de carbono			-55.790	-14.456

Tabla 9: Resultado del cálculo de sensibilidad.

Parámetro	Sensibilidad		
	Proyecto A	Proyecto B con apalancamiento	Proyecto B con apalancamiento y venta de CER
Costo de gas natural	1	-	-
Costo de combustibles	-	0,01	-
Tasa de interés del crédito	-	0,23	0,25
Valor de CER	-	-	-0,05
Distancia al CLB	-	0,007	-

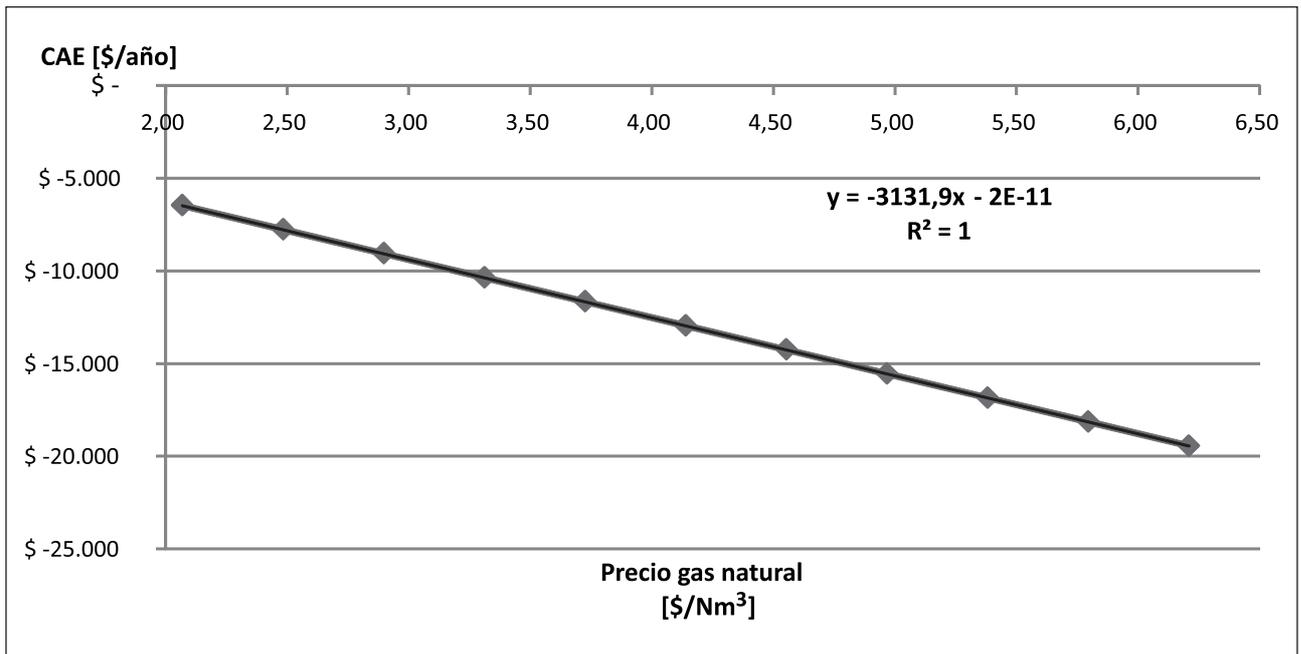


Figura 2: Resultados del análisis de sensibilidad del CAE del proyecto A con respecto al precio de gas natural.

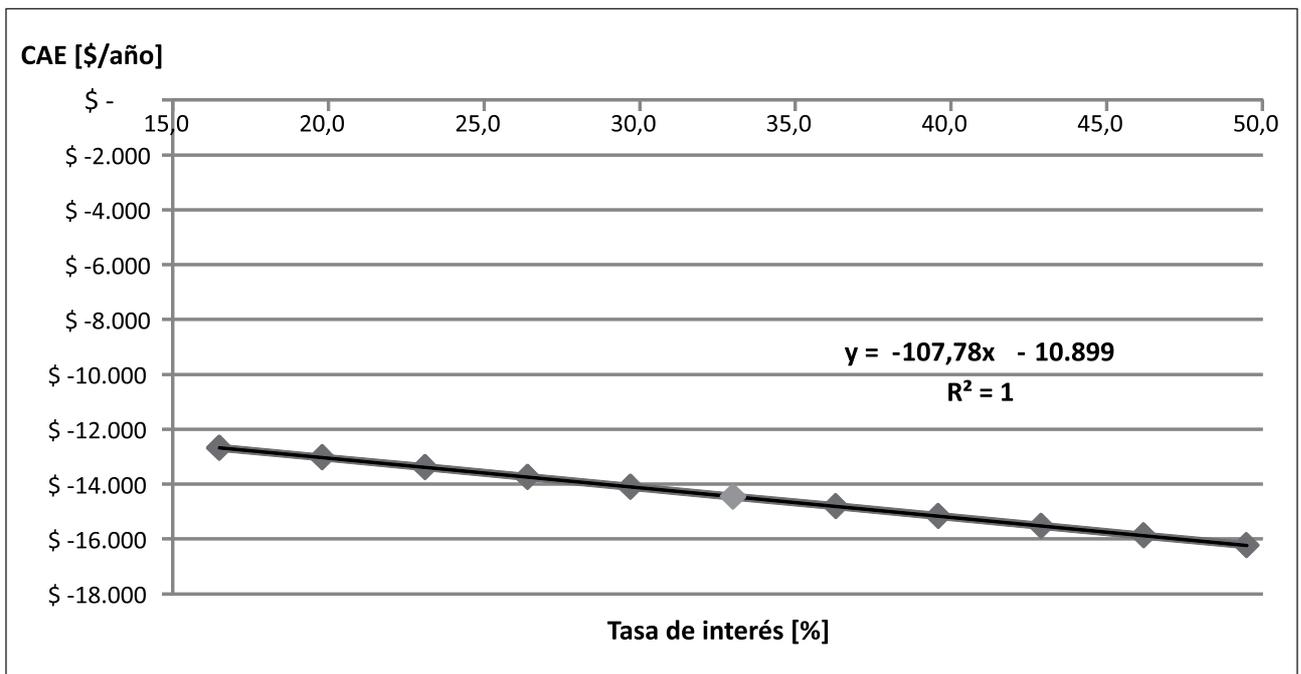


Figura 3: Resultados de CAE del proyecto B para diferentes valores de tasa de interés del crédito con venta de bonos de carbono.

línea] Disponible en <http://hdl.handle.net/2445/56090> (consultado el 25 de noviembre de 2014).

**Díaz G. y D. Paz. 2017.** Evaluación técnico-económica de una planta de gasificación de biomasa residual del cultivo del limón para el abastecimiento energético de una citrícola de Tucumán. Parte I. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. En revisión.

**Finnerty, J. D. & J. D. Stowe. 2000.** Fundamento de administración financiera. Pearson Educación.

**IDAE y BESEL SA. 2007.** IDAE. Biomasa – Gasificación. [En línea] Disponible en [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_gasificacion\\_07\\_d2adcf3b.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf) (consultado el 30 de enero de 2015).

- Investing. 2016.** Emisión de carbono histórico. [En línea] Disponible en <http://es.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>
- Martínez Reyes, A. M.; E. E. Silva Lora & O. J. Venturini. 2014.** Adecuación y transformación de la biomasa como combustible. En: Martínez J. M. & E. E. Silva Lora (Eds.) Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. Bogotá: La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, pp. 106.
- Metrogas. 2015.** Adigas. Comparación internacional de tarifas de gas natural para clientes residenciales e industriales a junio de 2015. [En línea] Disponible en <http://www.adigas.com.ar/documentos/pdf/2015/InformeJunio2015.pdf> (consultado el 5 de marzo de 2016)
- Paredes, V.; D. Pérez; G. Rodríguez; D. Figueroa y H. Salas. 2013.** Estadísticas y márgenes de cultivos tucumanos. Producción y comercialización del limón de Tucumán en el año 2012. Reporte agroindustrial. EEAO. Boletín N° 82.
- Peters, M. S. y K. D. Timmerhaus. 1993.** Plant design and economics for chemical engineers. USA: McGraw-Hill.
- Riera Mora, J. 2013.** Casos de éxito de gestión de centros logísticos de biomasa en la provincia de Barcelona. [En línea] Disponible en <http://www.congresobioenergia.org/ponencias/DBarcelona.pdf>
- Secretaría de Energía, Argentina. 2013.** Balance Energético Nacional.
- Silva Lora, E. E.; R. Vieira Andrade; C. G. Sanchez; E. Olivares Gómez y C. Vilas Bôas de Sales. 2014.** Gaseificação. En: Barbosa Cortez L. A.; E. E. Silva Lora & E. Olivares Gómez (Eds.). Biomassa para energia. Campinas: Unicamp, pp. 241-332.